



**TIEVERKON YLLÄPITOTARPEEN OHJAUS-
JÄRJESTELMÄ**

KUNTOTIEDOT JA KUNTOMALLIT:

Yhteenveto kesään 1988 mennessä tehdystä työstä

Erikoistutkija
Riitta Olsonen

08
TIE -



89 0373

ALKUSANAT

Tie- ja vesirakennuslaitoksessa on kehitteillä tieverkon ylläpitotarpeen ohjausjärjestelmä, joka kattaa mallit pitkän ja lyhyen tähtäyksen tieverkkotason suunnittelulle ja hanketason suunnittelulle kaikilla päällystetyypeillä. Mallit perustuvat rahoituksen ohjaamiseen niin, että mahdollisimman pienillä kustannuksilla voidaan ylläpitää mahdollisimman hyväkuntoinen tieverkko. Tämä raportti kuvaa mallien tarvitsemia tiestön kuntotietoja ja kuntomalleja yleisellä tasolla, sekä tarkemmin kestopäällystemallin verkkotason tähänastisia tuloksia.

Raportin on laatinut *erikoistutkija Riitta Olsonen*, joka haluaa kiittää koko ohjausjärjestelmää laativaa työryhmää hedelmällisestä yhteistyöstä.

p. 154-2513

Tutkimuskeskus, joulukuu 1988



Kirill Härkänen
apulaisjohtaja

217(1 07)

Sisällysluettelo

YHTEENVETO	4
JOHDANTO	5
1 PMS:N KUNTOMUUTTUJAT KESTOPÄÄLLYSTEILLE JA VERKKOTASON MALLIEN KUNTOLUOKAT	7
2 TIEKOHTAISET KUNTOMALLIT	8
3 TODENNÄKÖISYYSMALLIT	10
4 TARVITTAVAN AINEISTON KERUU	12
4.1 Koeteiden valinta kestopäällysteteillä	12
4.2 Toimenpiteiden vaikutuksen tutkiminen	13
4.3 Tutkimuksen kytkeytyminen muihin kuntotutkimuksiin	13
5 TÄHÄNASTISET TULOKSET SIIRTYMÄTODENNÄKÖISYYKSILLE ILMAN TOIMENPITEITÄ	16
5.1 Kantavuuden siirtymätodennäköisyydet	16
5.2 Vaurioiden, urien ja tasaisuuden siirtymätodennäköisyydet	18
5.2.1 Ensimmäiset todennäköisysestimaatit	18
5.2.2 Kritiikkiä	20
5.2.3 Toiset todennäköisysestimaatit	21
5.2.4 Kolmannet siirtymätodennäköisyydet	23
KIRJALLISUUS	24

YHTEENVETO

Tiestön kunnan tuntemisella on keskeinen merkitys teiden ylläpidon suunnittelussa. Rahoitus tulisi ohjata sellaisiin kohteisiin, että toteutettavat toimenpiteet pitäisivät tiestön parhaassa mahdollisessa kunnossa. Tässä tarkastellaan tiestön kuntotietojen tarvetta kehitteillä olevan ylläpitoinvestointien valinta- ja ajoitusjärjestelmän puitteissa. Kuten jäljempänä ilmenee, tämän järjestelmän tarpeisiin tehty tiedon keräyssuunnitelma luo hyvän pohjan kaikenlaisille tutkimuksille, joissa ollaan kiinnostuneita teiden kunnosta.

Ylläpitoinvestointien valinta- ja ajoitusjärjestelmä (lyh. PMS) koostuu kolmesta hierarkisesta mallista, pitkän ja lyhyen tähtäyksen verkkotasoisesta optimointimallista ja hanketason mallista. Verkkotason optimointijärjestelmät käyttävät aggregoitua tietoa: tiestö on jaettu erillisiin luokkiin liikennemäärän, alueen, kantavuuden, vaurioiden, urien ja tasaisuuden mukaan.

Optimointimallit tarvitsevat tietoja näiden luokkien välisistä kuntomuutoksista, toimenpiteiden vaikutuksista tiestön kuntoon ja käyttäjän kustannusten riippuvuudesta tien kunnosta. Hanketason mallissa tarvitaan tietoja tiekohtaisesta kunnosta ja arvioita sen kehittymisestä.

Toimenpiteiden vaikutuksesta tiestön kuntoon on tehty eri tutkimus (*Äijö ja Miettinen, 1987*) ja käyttäjän kustannusten ja tien kunnan välisestä yhteydestä on tietoja julkaisussa *Tieliikenteen ajokustannukset 1988*; tarkempi tutkimus tästä aiheesta on tekeillä.

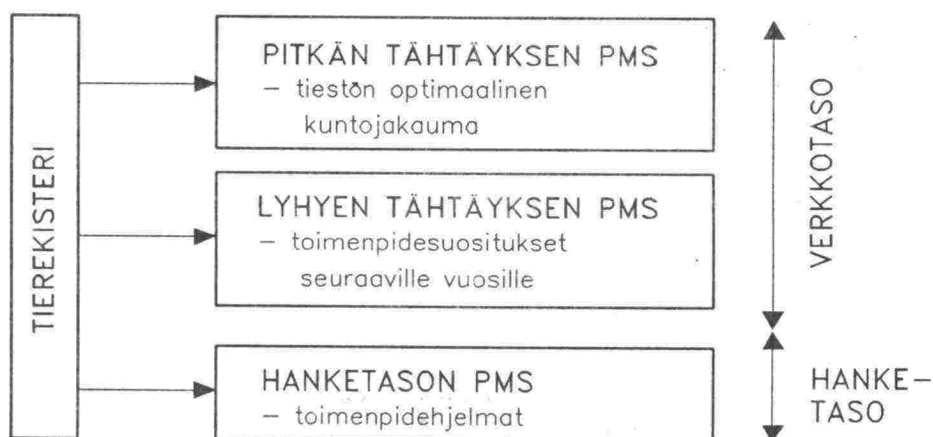
Tässä kirjoituksessa keskitytään tiestön kuntomuutosten arviointiin ja tämän tarvitseman tiedon hankkimiseen. Ensimmäisessä luvussa kuvataan verkkotason mallien kuntomuuttajat, toisessa ja kolmannessa tarkastellaan, missä muodossa kuntotiedot sisällytetään optimointimalleihin, neljännessä luvussa kuvataan kuntotietojen keräystä ja viidennessä esitetään alustavia tuloksia, jotka perustuvat aikaisemmin kerättyihin kuntotietoihin.

Kirjoituksessa ilmenee, että vain huolellisesti harkitulla ja tarkoituksenmukaiseen satunnaisotokseen perustuvalla tiedolla päästään päteviin koko tieverkkoa kuvaaviin kuntomalleihin.

JOHDANTO

TVH:ssa kehitetään parhaillaan integroitua ylläpitoinvestointien valinta- ja ajoitusjärjestelmää, lyhennetään tässä PMS (CSI, 1986 ja 1987, Thompson et al, 1987). Se sisältää kolme tasoa, jotka on esitetty kuvassa 1.

Kuva 1: Ylläpitoinvestointien valinta- ja ajoitusjärjestelmän rakenne



Pitkän ja lyhyen tähtäyksen optimointimallit ovat verkkotason työkaluja: edellisellä etsitään taloudellisesti parasta tiestön kuntotason ja jälkimmäisellä arvioidaan ne vuosittaiset toimenpidejakaumat, joilla taloudellisesti lähentyään optimaalista tiestön kuntotason. Hanketason järjestelmällä toimenpideohjelman tekijä suorittaa lopulliset valintansa käyttäen hyväkseen lyhyen tähtäyksen mallin antamia suosituksia ja tiekohtaisia tietoja. Verkkotason mallien prototyypit asfalttiteille ovat valmiita ja hanketason prototyyppi valmistuu vuoden 1988 loppuun mennessä. Öljysorasteiden ja sorasteiden järjestelmien kehittäminen on myös aloitettu.

Verkkotason optimointi perustuu Markov-malliin: oletetaan tieverkon kunnon riippuvan kunakin vuonna edellisen vuoden kunnosta ja tehdyistä toimenpiteistä ja oletetaan tämän riippuvuuden pysyvän tarkastelulla aikavälillä vakiona. Optimointi tässä kehikossa tapahtuu lineaarisella ohjelmoinnilla, jonka avulla voidaan vastata esimerkiksi kysymyksiin:

- mikä on tieverkon optimaalinen kuntojakauma?
- missä kunnossa tieverkko pysyy tietyllä budjettirahoituksella?
- kuinka paljon maksaa halutun kuntotason ylläpito?
- kuinka paljon maksaa haluttuun kuntotason pääseminen ja kuinka kauan se kestää?

Optimaalisuus on määritelty mahdollisimman pieninä tienpitäjän ja tienkäyttäjien kustannuksina.

Tässä järjestelmässä kuntotiedoilla on keskeinen merkitys. Verkkotasolla tarvitaan tietoja kuntosuostosten todennäköisyyksistä ja projektitasolla yksittäisten teiden kunnosta sekä sen kehityksestä tulevina vuosina. Lisäksi on tarpeen tietää mikä yhteys on tien kunnolla ja käyttäjän kustannuksilla sekä millä lailla toimenpiteet vaikuttavat teiden kuntoon. Järjestelmän käytössä on tierekisteri, johon on alettu kerätä myös tiestön kuntotietoja. Näitä kerätään kultakin tieltä muutaman vuoden välein.

Sekä kuntomuutosten todennäköisyydet että tiekohtaisen kunnan kehityksen arviointi vaativat tietoa peräkkäisiltä vuosilta. Koska ei ole järkevää mitata koko tiestön kuntoa vuosittain, on nämä arvioitava käyttäen sopivia malleja, joita varten kerätään edustavalta otokselta tietoa vuosittain.

Käyttäjän kustannusten ja tien kunnan välinen yhteys on myös arvioitava erillisellä tutkimuksella. Tästä on jo olemassa tietoa asteikolla tienpinnan kunto hyvä-keskinkertainen-huono (*Tieliikenteen ajokustannukset 1988*), mutta kattavampaan tietoon päästään tutkimustoimistossa aloitetun uuden tutkimuksen avulla, jossa ajokustannuksia mitataan samaan aikaan kuin kuntoa.

Toimenpiteiden vaikutuksen selvittämiseksi tarvitaan myös oma tutkimuksensa, jonka tiedonkeruu on aloitettu. Alustavasti toimenpiteiden vaikutusta tiestön kuntoon on arvioitu Delphi-kyselyn avulla (*Äijö ja Miettinen, 1987*).

Tilastomatemattiset kuntomallit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: toisaalta halutaan selvittää, mistä tekijöistä tien kunnan muuttuminen johtuu (kausaalimallit), ja toisaalta halutaan tietää kuinka kunto tulee muuttumaan (ennustemallit). Nämä malliryhmät palvelevat eri tarpeita, vaikka niissä saattaisi olla samoja selittäjiä. Useimmiten mallin käyttötarve sanelee varsin pitkälle mallin muodostamista.

PMS tarvitsee ennustemalleja. Ennustemalliin otettavat tekijät (selittäjät) on lisäksi valittava sellaisten tietojen joukosta, joiden kehittymistä voidaan ennakoida tai joita voidaan kontrolloida.

Optimointijärjestelmän verkko- ja tiekohtaisella tasolla tarvitaan erilaisia malleja. Verkkotasolla sekä pitkän että lyhyen tähtäyksen malleissa riittää tieto kuntoluokkayhdistelmien välisten siirtymien todennäköisyyksistä, kun taas projektitason PMS käyttää tiekohtaisia tietoja, jolloin on tarpeen ennakoida kuntomuutosten suuruutta ajan kuluessa.

Tässä kirjoituksessa keskitytään kuvaamaan PMS:n sekä verkkotason että projektitason mallien estimointia ja mallien estimointiin tarvittavan tiedon keruuta. Käyttäjien kustannusten ja tien kunnan välisiä riippuvuuksia ei tarkastella. Luvussa 1 kuvataan kestopäällystettyjen teiden PMS:n käyttämiä kuntomuuttujia, niiden luokitusta sekä sitä rakennetta, jolla kuvataan luokkien välisiä siirtymiä. Periaatteessa kehikko on samanlainen myös öljysorateille; sorateiden mallirakenne tulee poikkeamaan jonkin verran, koska osaa sorateiden kuntomuutoksista kuvataan vuotta lyhyemmällä aikavälillä. Luvuissa 2 ja 3 tarkastellaan erilaisia PMS:n mallitarpeita tietasolla ja verkkotasolla. Havaintoaineiston keruuta mallien tarpeisiin kuvataan luvussa 4. Kestopäällyste-PMS:n osalta estimoidut alustavat siirtymätodennäköisyydet esitetään luvussa 5.

Kuntoluokkayhdistelmä = kantoisuus + rannat + maat + Tiesäily

*Siirtymä = kuntoluokan muutos seuraavaan vuoteen
tullaan*

1 PMS:N KUNTOMUUTTUUJAT KESTOPÄÄLLYSTEILLE JA VERKKOTASON MALLIEN KUNTOLUOKAT

Suomen kestopäällysteisen tieverkon kuntomuuttujien valintaa on tarkasteltu tekemällä faktorianalyysi (Talvitie ja Olsonen, 1988), jossa tarkasteltiin tiestö- ja kuntotietojen jakautumista samoja ilmiöitä kuvaaviin ryhmiin. Osoittautui, että tiestön tilaa voidaan varsin pitkälle kuvata faktoreilla "urat", "geometria", "vauriot", "kantavuus" ja "tien leveys". Analyysissä käytetyssä aineistossa ei ollut tietoa tasaisuudesta, mutta faktoreista pois jääneet muuttujat kokemuseräisen tiedon mukaan ovat vahvasti yhteydessä tasaisuuteen. Faktorianalyysin perusteella päätettiin valita kestopäällystetyn tieverkon kuntoa kuvaaviksi muuttujiksi kantavuus, vauriot, urat ja tasaisuus. Analyysi antoi myös vahvan tuen sekä tien geometrian että leveyden poisjättämiseen, koska nämä osoittautuivat omiksi faktoreikseen, ja voidaan näin olettaa riippumattomiksi valituista kuntomuuttujista.

Markov-malliin perustuva optimointijärjestelmä edellyttää kuntomuuttujien jakamista luokkiin, joita käytännössä ei voi olla kovin monia, jotta laskelmat voidaan suorittaa kohtuullisessa ajassa ja laskelman tulokset ymmärtäen. Hyvien tulosten saaminen vaatii riittävän homogeenisia kuntoluokkia tiestön tilan luotettavaksi kuvaamiseksi. Nämä kaksi asiaa rajoittavat kuntoluokkien lukumäärää ylhäältä ja alhaalta.

Kuntomuuttujien vaikutus tien ajokelpoisuuteen riippuu myös huomattavasti liikennemäärästä sekä ilmastollisista olosuhteista. Kuntoluokkien homogeenisuuden takaamiseksi on tarpeen määritellä ne erikseen liikenteestä ja alueesta riippuen.

Alueiden määrittämiseksi tarkasteltiin kaikkien tiepiirien kuntojakauksia ja niiden keskinäisiä eroja. Osoittautui, että karkealla tasolla maa voidaan jakaa kahteen alueeseen (toisessa piirit Uusimaa, Turku, Häme, Kymi ja Vaasa ja toisessa muut piirit), joissa kuntomuuttujien jakaumat ovat keskenään homogeenisia, mutta alueiden kesken erilaisia.

Liikenteen suhteen tarkasteltiin myös kuntojakauksia eri liikennemääräluokissa. Päätettiin jakaa tieverkko liikennemäärän suhteen kolmeen luokkaan jakopisteinä KVL:n arvot 1500 ja 6000.

Näin kestopäällysteinen tieverkko jakautuu verkkotason malleissa kuuteen osaan, joita tarkastellaan erillisinä osatieverkkoina, joiden kesken etsitään erikseen optimaalinen rahoitusallokointi (CSI, 1986, s.39). Tiestön kuntojakaukset määritellään tästä eteenpäin olettaen, että ne edustavat kutakin näistä kuudesta osatieverkosta.

Kuntoluokkien muodostamiseksi tarkasteltiin muuttujien vaihtelualueita, mittaustarkkuuksia sekä muutosten suuruutta ajan suhteen. Näillä perusteilla vauriot (V), urat (U) ja tasaisuus (T) jaettiin kukin kolmeen luokkaan, mutta kantavuudelle (K) varattiin viisi luokkaa, koska se muuttuu selvästi muita hitaammin ja aikatekijä haluttiin näin ottaa huomioon. Kuntoluokkayhdistelmiä kertyy näin $5 \times 3 \times 3 \times 3 = 135$ kpl.

Kantavuuden luokkarajat riippuvat liikennemäärästä, koska runsas liikenne rasittaa tien rakenteita enemmän kuin vähäinen:

Kantavuusluokkien rajat (MN/m ²)		KVL		
		≤1500	1501-6000	>6000
Kantavuusluokka	1	>230	>260	>330
	2	201-230	241-260	311-330
	3	171-200	221-240	251-310
	4	141-170	201-220	211-250
	5	≤140	≤200	≤210

Vauriot havaitaan osuutena tienpituudesta. Erilaisten vauriomittojen (verkko-, pitkittäis- ja poikittaishalkeamat, paikkaukset, reiät, puhkikulumat jne.) yhdistäminen yhdeksi vaurioitumista kuvaavaksi mitaksi on ongelmallinen tehtävä (katso esim. *Paterson, 1986*). PMS:ää varten määriteltiin vauriot painotettuna keskiarvona kolmesta vauriotyypistä:

$$\text{vauriot} = 0.7 \times \text{verkkohalkeamat} + 0.2 \times \text{pituushalkeamat} + 0.1 \times \text{paikkaukset} (\%).$$

Tämä vauriomitta vaihtelee välillä 0 - 100% ja sen luokkarajoiksi määritettiin 0% ja 20%.

Urasyyvyys mitataan maksimiuran syvyytenä (mm) tienpinnan tasosta. Uraluokkien jakopisteet ovat 13mm ja 19mm. Tasaisuus mitataan joko pitkittäissuuntaisena epätasaisuutena (m/1000m) tai subjektiivisena PSR-arvona. Kansainvälisten standardien mukainen IRI-arvo on jatkossa käyttöön suositeltava. Koska IRI-arvoa ei toistaiseksi ole mitattu, käytetään tasaisuuden mittana PSR-arvoa jakopisteinä 2 ja 3.5.

Siirtymätodennäköisyydet riippuvat tiellä tehtävistä toimenpiteistä. Kutakin toimenpidettä varten tarvitaan omat siirtymätodennäköisyydet

$$(2.1) \quad p(K_{t+1}, V_{t+1}, U_{t+1}, T_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t).$$

Siirtymätodennäköisyysmatriisi (kuva 2) sisältää kullekin kuntoluokkapaarille todennäköisyyden, että vuoden t kuntoluokasta (K_t, V_t, U_t, T_t) siirrytään seuraavana vuonna kuntoluokkaan $(K_{t+1}, V_{t+1}, U_{t+1}, T_{t+1})$. Siirtymätodennäköisyysmatriisi sisältää 135×135 ruutua.

Kuvassa 2 esitetty matriisi kuvaa siirtymätodennäköisyyksiä, kun tiellä ei tehdä toimenpiteitä. Tässä lävistäjän alapuolella olevat todennäköisyydet voidaan asettaa nolliksi, koska tien kunto ei voi parantua ilman toimenpiteitä. Jos tiellä tehdään toimenpide, joka parantaa tien kuntoa, ovat vastaavassa siirtymätodennäköisyysmatriisissa puolestaan lävistäjän yläpuoliset todennäköisyydet nollija.

Kuva 2: Siirtymätodennäköisyysmatriisi ilman toimenpiteitä

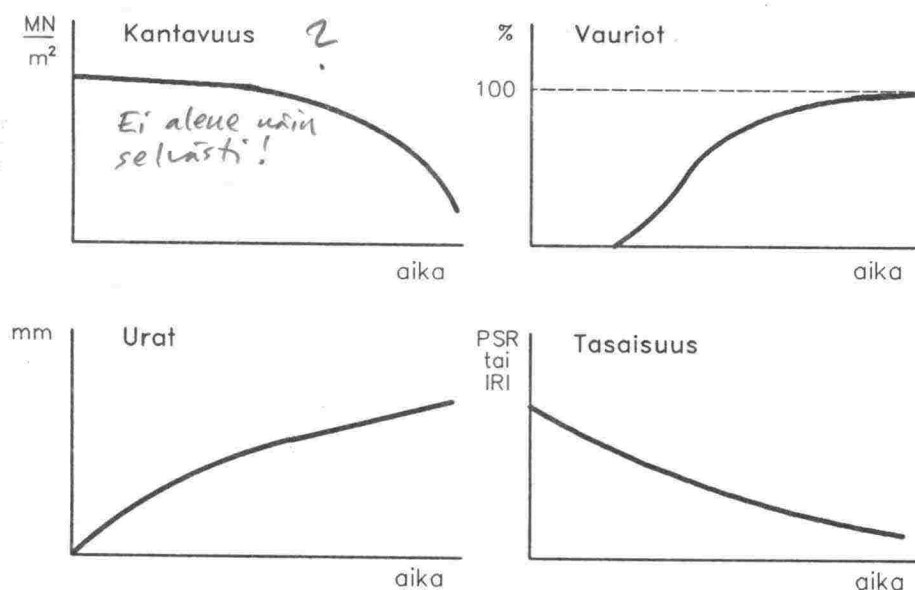
	K_1			K_2			K_3			K_4			K_5		
	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
K_1	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
K_2	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
K_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
K_4	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
K_5	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3

	T_1	T_2	T_3
T_1			
T_2	0		
T_3	0	0	

2 TIEKOHTAISET KUNTOMALLIT

Projektitason PMS eli PAS käsittelee tiestöä tie kerrallaan. Tierekisterissä tulee lähitulevaisuudessa olemaan tiekohtaiset tiedot PAS:n tarvitsemista kuntomuuttujista. Näitä tietoja ei kuitenkaan kerätä joka vuosi, ja lisäksi on tarpeen ennakoida tien kunnon muuttumista myös tulevana vuosina. Näitä tarpeita varten on kehitettävä mallit, jotka kuvaavat tien kunnon muutosten suuruutta ajassa, lähinnä vuositasona. Jos tiellä ei tehdä toimenpiteitä, edellisessä luvussa määritellyt kuntomuuttujat käyttäytyvät karkeasti ottaen kuvien 3 mukaisesti.

Kuva 3: Tien eri kuntotekijöitä ajan funktiona



Kantavuus pysyy kauan lähtötasollaan, kunnes tien tarpeeksi rappeuduttua kantavuus alkaa kiihtyvällä vauhdilla heiketä (Talvitie ja Viren, 1985). Vaurioita ei tiellä ole muutamaan vuoteen, mutta kerran alettuaan vaurioituminen etenee kunnes koko tien pinta on kauttaaltaan vaurioitunut (Paterson, 1986).

Urat alkavat kehittyä välittömästi toimenpiteen jälkeen ja normaalisti urautuminen on aluksi nopeampaa kuin myöhemmin vuosina (Korhonen, 1985). Tasaisuus alkaa myös heiketä heti toimenpiteen jälkeen, ja tien ominaisuuksista riippuen heikkeneminen saattaa olla varsin nopeaa (Teiden kunto ja palvelutaso, VTT 1985).

Koska voidaan olettaa, että tulevana vuosina kullekin tielle on saatavissa kohtuullisen tuore mitattu kuntotieto, kannattaa tätä tietoa käyttää hyväksi ennustetta laskettaessa. Näin ollen mallit ennakoivat kunnossa tapahtuvia muutoksia ajassa, eli tarvittavat mallit ovat tyyppiä

$$\Delta \text{kunto}_t = f(\text{kunto}_t, \text{muut selittäjät}),$$

jossa Δkunto_t on kunnan muutos vuodesta t vuoteen $t+1$ ja kunto_t on kunto vuonna t . Muutosta kuvaava funktio on erilainen eri kuntomuuttujille, esimerkiksi urille luultavasti käy lineaarinen regressiomalli logaritmoiduin muuttujin.

Vauriomuuttujan osalta ei muutoksia tapahdu alkuvuosina, joten sopivan funktiotyypin löytyminen on hankalaa. *Paterson (1986)* esittääkin, että vaurioitumisen alkaminen on eri prosessi kuin jo kerran alkaneen vaurioitumisen eteneminen. Tämä edellyttää kahden eri mallin estimointia vaurioille. Vaurioitumisen alkaminen on diskreetti tapahtuma, joka voidaan mallittaa sopivalla eloonjäämismallilla (survival model), kun taas vaurioitumisen eteneminen jatkuvana prosessina voidaan mallittaa sopivalla tavanomaisemmalla mallilla. Tässäkin vaurioitumisen kuvaaminen prosentteina tien pituudesta asettaa rajoituksia mallin muodolle, koska selitettävä muuttuja voi saada arvoja vain 100% asti.

Alustavien kokeilujen perusteella todettiin, että käytettävissä olevista mittaustuloksista ei saada niin tarkkoja kuntomuutosmalleja, että niitä kannattaisi hyödyntää hanketason mallissa.

Mallien estimointi odottaa luvussa 4 esitettävän mittaushjelman mukaisten mittauksen kertymistä niin laajoiksi, että voidaan estimoida käyttökelpoiset mallit.

3 TODENNÄKÖISYYSMALLIT

Siirtymätodennäköisyyksien estimoimiseksi jaetaan todennäköisyys (2.1) ehdollisten todennäköisyyksien tuloksi:

$$\begin{aligned}
 (2.2) \quad & p(K_{t+1}, V_{t+1}, U_{t+1}, T_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t) = \\
 & p(K_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t) \times \\
 & p(V_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t, K_{t+1}) \times \\
 & p(U_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t, K_{t+1}, V_{t+1}) \times \\
 & p(T_{t+1} \mid K_t, V_t, U_t, T_t, K_{t+1}, V_{t+1}, U_{t+1}).
 \end{aligned}$$

Näin kunkin kuntomuuttujan siirtymätodennäköisyyksiä voidaan tarkastella erikseen. Jako ehdollisten todennäköisyyksien tuloksi voidaan tehdä periaatteessa missä järjestyksessä tahansa; tässä esitetyn on ajateltu heijastavan kuntomuuttujien aikajärjestystä eli kantavuus muuttuu hitaimmin ja tasaisuus nopeimmin. Lauseke (2.2) on vasta identiteetti, josta havaintoaineistosta estimoitavat mallit tuovat esiin todella ilmiöön vaikuttavat selittäjät eli ehtomuuttujat. Todennäköisyydet riippuvat tietenkin myös alueesta ja liikenteestä, mutta verkkomallien puitteissa muut selittäjät ovat epärelevantteja.

Nämä todennäköisyydet voidaan estimoida monella tavalla. Jos tiestön kunto mitataan vuosittain koko tieverkolla, on mahdollista laskea todennäköisyydet suoraan vuoden kuluessa luokasta toiseen siirtyneiden tiepituuksien prosenttiosuuksina.

Arizonan PMS:ssä on käytetty tämän tapaista menetelmää (*Way, Eisenberg ja Kulkarni, 1982*) yhdessä tien kuntoa ennustavien mallien kanssa. Malleilla ennustetaan seuraavan vuoden kuntoarvot (vauriomuutos ja tasaisuus), kun edellisen vuoden kunto tiedetään. Ennustettujen arvojen perusteella lasketaan seuraavan vuoden kuntojakauma. Kun todennäköisyyksien määrittäminen perustuu laajoihin vuosittaisiin mittauksiin ja tarkkoihin malleihin, tämä tapa tuottaa erittäin hyvän arvion tiestön kunnosta etenkin lyhyellä aikavälillä.

Todennäköisyydet (2.2) voidaan estimoida myös suoraan sopivasta peräkkäisinä vuosina kerätystä aineistosta. Kukin ehdollisista todennäköisyyksistä vaurioille, urille ja tasaisuudelle voidaan esittää osamatriisina:

ilman toimenpiteitä

$p(M_{t+1} | M_t, \dots)$	M_{t+1}		
	1	2	3
M_t 1	p_{11}	p_{12}	p_{13}
2	0	p_{22}	p_{23}
3	0	0	1

kun tehdään toimenpide

$p(M_{t+1} | M_t, A_k, \dots)$	M_{t+1}		
	1	2	3
M_t 1	1	0	0
2	p_{21}	p_{22}	0
3	p_{31}	p_{32}	p_{33}

jossa M on mikä tahansa muuttujista V , U tai T , ja A on toimenpide. Kantavuudelle voidaan kirjoittaa vastaava 5×5 -matriisi. Tarkastellaan lähemmin ensimmäistä matriisia (samat tarkastelut sopivat soveltaen myös toiselle matriisille ja kantavuudelle). Lukujen p_{ij} estimoimiseksi tarvitaan kaksi mallia, toinen ehdolla $M_t=1$ ja toinen ehdolla $M_t=2$.

Jälkimmäisessä tapauksessa todennäköisyydet p_{22} ja p_{23} ($p_{22} = 1 - p_{23}$) jakautuvat binomijakauman mukaisesti. Sopiva yksinkertainen tilastollinen malli tällaiselle selitettävälle muuttujalle on logistinen regressiomalli

$$\log(p/(1-p)) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k,$$

jossa x_1, \dots, x_k ovat mallin selittäjiä ja $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ tuntemattomia havaintoaineiston perusteella estimoitavia parametrejä. Logistinen regressiomalli on eräs yleistetty lineaarinen malli, joka vastaa tavallista lineaarista regressiomallia. Logistisessa mallissa on otettu huomioon, että selitettävä (todennäköisyys p) voi saada arvoja vain nollan ja ykkösen väliltä. Yleistettyjen lineaaristen mallien teoriaa on selostettu mm. kirjassa *McCullagh ja Nelder: Generalized Linear Models* (1983).

Tapauksessa $M_t=1$ todennäköisyydet p_{11}, p_{12} ja p_{13} jakautuvat multinomijakauman mukaisesti. Myös tässä tapauksessa yleistettyjen lineaaristen mallien joukosta löytyy sopiva mallityyppi. Koska kuntoluokat muodostavat järjestetyn joukon ($M=1$ on paras, $M=2$ keskimmäinen ja $M=3$ huonoin kuntoluokka), on sopiva malli ns. ordinaalisen asteikon logit-malli

$$\log(\theta_j/(1-\theta_j)) = \delta_j - (\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k),$$

jossa $j=1,2$, $\theta_1=p_{11}$, $\theta_2=p_{11}+p_{12}$, muuttujat x_1, \dots, x_k ovat mallin selittäjiä ja $\delta_1, \delta_2, \beta_0, \dots, \beta_k$ tuntemattomia estimoitavia parametrejä. Ordinaalisen asteikon logit-mallia on käsitelty em. McCullaghin ja Nelderin kirjan (s. 103) lisäksi artikkelissa *McCullagh (1980)* ja estimointitekniikkaa artikkelissa *Ekholm, Green ja Palmgren (1986)*.

Todennäköisyyksiä (2.2) estimaattaessa relevantit selittäjäehdokkaat x_1, \dots, x_k ovat kunkin muuttujan kohdalla ehtomuuttujat (esim. vaurioitumisen selittäjinä tulevat kyseeseen kantavuusluokka K_t ja K_{t+1} , uraluokka U_t ja tasaisuusluokka T_t) sekä liikennemääräluokka ja alue.

Vaurioiden kohdalla edellisessä luvussa esitetty vaurioiden alkamismalli (*Paterson ja Chesher, 1986*) sopii myös siirtymätodennäköisyyksien estimointiin, koska ensimmäinen vaurioluokka sisältää vauriottomat tiet.

4 TARVITTAVAN AINEISTON KERUU

Edellä on käynyt selväksi, että PMS:n tarvitsemien mallien muodostamiseksi on välttämättöntä kerätä jatkuvasti tiestön kuntomuutostietoja, jotta mallit voitaisiin estimoida ja jotta niitä voitaisiin pitää aina ajan tasalla.

Koska koko tieverkkoa on mahdotonta joka vuosi mitata, on valittava sopiva määrä kohteita, joiden kuntoa mitataan vuosittain. Koetiet on valittava siten, että ne edustavat mahdollisimman hyvin eri kuntoisia teitä ja että tulokset ovat yleistettävissä koko tieverkolle. Ensimmäinen vaatimus edellyttää kohteiden valintaa tasaisesti kkaiken kuntoisilta tieltä, ja satunnaistaminen on ehdoton edellytys tulosten yleistämiseksi. Kestopäällystettyjen teiden PMS:ssä tiestö on jaettu kahteen alueeseen, kolmeen liikennemääräluokkaan ja kuntomuuttajat ovat kantavuus, vauriot, urat ja tasaisuus.

Jotta kaikissa kuntoluokissa päästäisiin mahdollisimman hyvään estimaattiin, on havaintoaineiston edustettava hyvin niitä kaikkia. Otoksen valinta on suoritettava tierekisterin avulla. Sieltä löytyvät tiedot alueesta, liikenteestä ja kantavuudesta, mutta muiden kuntomuuttajien osalta tietoa ei toistaiseksi ole. Tehokkain tapa valita mitattavat tiet on yhdistelykoe (factorial design), jossa faktoreiksi valitaan kaikki relevantit muuttajat PMS:ssä määriteltyjen luokkien mukaan. Faktoreiksi tulevat näin 2 aluetta, 3 liikennemääräluokkaa ja 5 kantavuusluokkaa. Urille, vaurioille ja tasaisuudelle täytyy löytää joku tierekisteristä oleva muuttuja, joka ilmaisee näiden muuttajien vaihtelua. Päällysteen ikä lienee tähän tarkoitukseen sopivin. Asfalttatieverkko jaetaan päällysteen iän mukaan kolmeen luokkaan: alle 4 vuotta, 4–9 vuotta ja yli 9 vuotta vanhat päällysteet. Jakopisteet on valittu siten, että päällysteen iän logaritmi jakaa iän vaihtelualueen kolmeen yhtä pitkään osaan. Tällainen uusien päällysteiden painottaminen on tarkoituksenmukaista urien estimointitarkkuuden kannalta, koska urat syvenevät lineaarisesti päällysteen iän logaritmin suhteen.

Yhdistelykokeeksi tulee näin $2 \times 3 \times 5 \times 3$ -kaavio. Käytännössä todettiin 1500 mittausyksikköä (pituus 1000 m) sopivaksi kokonaismääräksi. Tällöin kaavion kustakin ruudusta tulee suorittaa 17 mittausyksikön satunnaisotos. Satunnaisella otoksella varmistetaan se, että tulokset voidaan yleistää koskemaan koko asfalttatieverkon kuntoa.

4.1 Kohteiden valinta kestopäällysteteillä

Tierekisteristä muodostettiin yhdistelemällä yllämainittujen muuttajien suhteen homogeenisia tienpätkiä sisältävä tiedosto, joka jaettiin 90 osaan faktoreiden alue, KVL, kantavuus ja päällysteen ikä perusteella. Näissä osissa valittiin kussakin satunnaisesti 17 mittausyksikköä vähintään kilometrin pituisten homogeenisten pätkien joukosta.

Kestopäällysteisillä teillä oli 1.1.1987 tierekisterissä vähintään kilometrin pituisia homogeenisia tienpätkiä yhteensä 9984 kpl, jotka jakautuvat kaaviossa *taulukon 1* (s. 14) mukaan. Kuten siitä nähdään, ei aineisto liikennemääräluokassa $KVL > 6000$ riitä tarvittavaan toistojen määrään kaikissa kantavuusluokissa. Koska mittauksia suoritetaan useana peräkkäisenä vuonna ja päällysteen ikä näin ollen vaihtelee, päätettiin kiinnittää kussakin kantavuusluokassa toistojen määrä viideksikymmeneksi. *Taulukossa 2* (s. 15) on esitetty valittujen mittausyksiköiden määrät, joita yhteensä kertyi 1463 kappaletta. Otosteiden luettelo on olemassa erillisenä listana.

Näiltä mittausyksiköiltä mitataan kantavuus, vauriot, urat ja tasaisuus vuosittain. Näillä tiedoilla estimoidaan siirtymätodennäköisyydet tapauksessa, jolloin tiellä ei tehdä toimenpiteitä. Jos jollekin otoksessa olevalle tielle tehdään toimenpide, se voi pysyä mukana. Muutostietoihin tulee vain vuoden katkos, ja tätä tietoa voidaan käyttää estimoitaessa kyseisen toimenpiteen aiheuttamaa kuntomuutosta.

Tähänastisissa tutkimuksissa on todettu kuntotietojen vaihtelevan todella paljon, joten kaikki mahdollinen tulee tehdä tämän hajonnan pienentämiseksi. Mittausten toistettavuus tulisi selvittää erillisellä toistettavuustutkimuksella.

4.2 Toimenpiteiden vaikutuksen tutkiminen

Toimenpiteiden vaikutus tien kuntoon mitataan erikseen valitsemalla vuosittain toimenpideohjelmasta mitattavat tiedot. PMS:ssä toimenpiteet on luokiteltu ryhmiksi (asfalttiteiden mallissa on seitsemän ryhmää), joille kullekin on estimoitava omat siirtymätodennäköisyytensä. Kustakin ryhmästä tulee saada riittävä määrä havaintopareja: mittaus ennen toimenpidettä ja seuraavana kesänä. Vuosittaisissa toimenpideohjelmissa ei aina ole edustavaa määrää kaikkia PMS:ssä määriteltäviä toimenpidetyyppejä, joten tietoja jouduttaneen keräämään useampana vuonna ennenkuin kaikki siirtymätodennäköisyydet voidaan estimoida samoilla menetelmillä kuin ei tehdä mitään-tapauksessa.

Kesällä 1988 mitattiin kaikissa toimenpideryhmissä kussakin noin 30 toimenpidekohdetta, ja mittaukset toistetaan v. 1989 samoissa paikoissa.

4.3 Tutkimuksen kytkeytyminen muihin kuntotutkimuksiin

Valittu otoskehikko antaa mahdollisuuden suorittaa myös muita mittauksia, joilla on käyttöä PMS:ssä. Esimerkiksi käyttäjän kustannusten riippuvuutta tien kunnosta voidaan tutkia samalla kertaa. Kyseiset mittaukset on aloitettu kesällä 1988. Suuren työmäärän vuoksi näitä mittauksia voidaan tehdä vain osalla kohteita.

Ositus alueen, liikenteen määrän, kantavuuden ja päällysteen iän mukaan sekä satunnaistaminen näissä ositteissa takaavat sen, että koko kestopäällystetyn tieverkon kunnosta saadaan hyvä tieto myös muita tutkimuksia varten. Mittausohjelma on huomattavan laaja ja raskas vuosittainen työ, joten tästäkin syystä muut tiestön kunnon tutkimukset voitaisiin tehdä tällä samalla otoksella, kun halutaan selvittää tilannetta koko tiestöllä tai tietyllä päällysteellä koko maassa.

Vastaavat mittausohjelmat on käynnistetty myös öljysora- ja sorateilla, joten esitetyllä mittausohjelmalla tullaan saamaan vuosien mittaan varsin kattava tieto teiden kunnosta.

Taulukko 1: Kestopäällysteiden jakautuminen alueen, liikennemäärän, kantavuuden ja päällysteen iän mukaan (km, alle kilometrin pituiset osuudet puuttuvat)

Alue	KVL	Kantavuus- luokka	Päällysteen ikä			
			≤3 v	4-9 v	>9 v	Yht.
Etelä	≤1500	1	221	269	130	620
		2	62	157	42	261
		3	100	169	49	318
		4	62	202	58	322
		5	152	235	115	502
		yht.	597	1032	394	2023
	1501- 6000	1	1075	730	209	2014
		2	190	129	30	349
		3	154	93	32	279
		4	82	76	39	197
		5	181	278	68	527
		yht.	1682	1306	378	3366
	>6000	1	375	50	1	426
		2	39	5	1	45
		3	154	20	0	174
		4	40	10	0	50
		5	40	9	2	51
		yht.	648	94	4	746
Poh- joinen	≤1500	1	249	129	133	511
		2	152	139	63	354
		3	124	82	61	267
		4	130	24	49	203
		5	63	31	23	117
		yht.	718	405	329	1452
	1501- 6000	1	443	232	113	788
		2	133	118	42	293
		3	158	141	31	330
		4	138	129	38	305
		5	160	230	82	472
		yht.	1032	850	306	2188
	>6000	1	30	3	3	36
		2	31	0	0	31
		3	41	8	13	62
		4	39	6	1	46
		5	28	2	4	34
		yht.	169	19	21	209

Taulukko 2: Kestopäällysteiden otostieosuuksien lukumäärät eri ositteissa

1987 (0...79v)

Alue	KVL	Kantavuus- luokka	Päällysteen ikä			Yht.
			≤3 v	4-9 v	>9 v	
Etelä	≤1500	1	17	17	17	51
		2	17	17	17	51
		3	17	17	17	51
		4	17	17	17	51
		5	17	17	17	51
		yht.	85	85	85	255
	1501- 6000	1	17	17	17	51
		2	17	17	17	51
		3	17	17	17	51
		4	17	17	17	51
		5	17	17	17	51
		yht.	85	85	85	255
	>6000	1	17	32	1	50
		2	39	5	1	45
		3	30	20	0	50
		4	40	10	0	50
		5	40	9	2	51
		yht.	166	76	4	246
Poh- joinen	≤1500	1	17	17	17	51
		2	17	17	17	51
		3	17	17	17	51
		4	17	17	17	51
		5	17	17	17	51
		yht.	85	85	85	255
	1501- 6000	1	17	17	17	51
		2	17	17	17	51
		3	17	17	17	51
		4	17	17	17	51
		5	17	17	17	51
		yht.	85	85	85	255
	>6000	1	30	3	3	36
		2	31	0	0	31
		3	29	8	13	50
		4	39	6	1	46
		5	28	2	4	34
		yht.	157	19	21	197

5 TÄHÄNASTISET TULOKSET SIIRTYMÄTODENNÄKÖISYYKSILLE ILMAN TOIMENPITEITÄ

Koska edellisessä luvussa esitetty aineiston keruu on aloitettu vasta kesällä 1988, on alustavien mallien saamiseksi käytetty jo kerättyjä kuntotietoja.

Kantavuustieto löytyy tierekisteristä mittausvuosineen, mutta muutostietoja ei ole.

Vaurioista ja urista on vuodesta 1982 lähtien kerätty tietoa VTT:n uramittarilla (*esim. Kesto-päälysteisten teiden kunto vuonna 1985, VTT 1986*). Vuosien 1982–1985 aineistossa on 3560 km teitä, joilta on mittauksia sekä vaurioista että urista kahdelta peräkkäiseltä vuodelta. Nämä tiedot on yhdistetty tierekisteritietojen kanssa ns. homogeenisiksi tienpätkiksi (2708 kpl), joilla tärkeimmät muuttujat pysyvät samoina.

Tasaisuudesta on erikseen kerätty tietoa vuosina 1979–1983 ^{1/2}26 noin kolmen kilometrin pituiselta tienpätkältä (*Teiden kunto ja palvelutaso, VTT 1985*). Tasaisuutta on mitattu epätasaisuuslukuna (cm/km) ja PSR-arvona. Lisäksi on havaittu vaurioita ja uria, mutta vauriot on mitattu neliömetreinä ja urista on tietoa hyvin vähän.

5.1 Kantavuuden siirtymätodennäköisyydet

Koska kantavuudesta ei ollut käytettävissä muutostietoja, jouduttiin nämä siirtymätodennäköisyydet estimoimaan muista poikkeavalla tavalla.

Kantavuuden oletetaan muuttuvan kuntoluokkien välillä niin hitaasti, ettei siirtymiä minkään luokan yli tapahdu vuoden kuluessa. Näin jäävät estimoitaviksi todennäköisyydet

$$p(K_{t+1}=j+1 \mid K_t=j), \text{ jossa } j=1,2,3,4.$$

Estimointi tapahtuu seuraavasti:

Aikaisemmin estimoitujen kantavuuden muutosta kuvaavien mallien (*Talvitie ja Viren, 1985*) avulla lasketaan mittausvuodesta lähtien tapahtuvat kantavuuden muutokset kullekin tielle. Liikenteen määrää kasvatetaan TVH:n raskaan liikenteen ennusteiden mukaan (*Liikenne- ja autokantaennuste 1986–2010, TVH 1987*).

Lähtövuoden 1985 kantavuusarvojen perusteella kukin kuudesta alue-liikennemääräluokasta jaetaan viiteen kantavuusluokkaan. Näistä luokista tapahtuvat siirtymät seuraavaksi alempaan luokkaan lasketaan vuosille 2001–2010. Aikajänne on jouduttu valitsemaan näin pitkäksi, koska kantavuuden heikkeneminen on hyvin hidas prosessi eikä positiivisia siirtymätodennäköisyyksiä saada kaikkiin luokkiin aikaisempien vuosien tulosten perusteella. Kun oletetaan yhden vuoden siirtymätodennäköisyys p samaksi koko tarkasteltavalla aikavälillä, voidaan sen arvo laskea usean (n) vuoden siirtymätodennäköisyyksien avulla kaavalla

$$p = 1 - (1 - p_n)^{1/n}.$$

Nämä todennäköisyydet laskettiin kussakin 30 alue-KVL-kantavuusryhmässä vuosiin 2001–2010 mennessä tapahtuneiden siirtymien perusteella. Näiden keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukossa 3.

Keskiarvojen hajonnat ovat ensimmäistä lukuunottamatta niin pieniä, että näitä lukuja voidaan pitää riittävinä kuvaamaan kantavuuden siirtymätodennäköisyyksiä.

Taulukko 3: Kantavuuden siirtymätodennäköisyydet $p(K_{t+1} | K_t)$

Alue	KVL	Kantavuus- luokka	Keskiarvo	Hajonta
Etelä	≤1500	1	.00048	.00043
		2	.00153	.00016
		3	.00223	.00022
		4	.00184	.00087
	1500– 6000	1	.00289	.00075
		2	.01278	.00072
		3	.01595	.00131
		4	.02002	.00233
	>6000	1	.00417	.00089
		2	.02718	.01432
		3	.01597	.00315
		4	.02960	.01343
Poh- joinen	≤1500	1	.00037	.00017
		2	.00046	.00020
		3	.00036	.00017
		4	.00043	.00003
	1500– 6000	1	.00218	.00042
		2	.00728	.00140
		3	.00482	.00147
		4	.00649	.00163
	>6000	1	.00779	.00419
		2	.06627	.02809
		3	.01920	.00370
		4	.03096	.00619

5.2 Vaurioiden, urien ja tasaisuuden siirtymätodennäköisyydet

Koska vaurioista, urista ja tasaisuudesta oli saatavissa tietoa peräkkäisiltä vuosilta, pyrittiin niiden siirtymätodennäköisyydet estimoimaan suoraan luvussa 3 kuvattujen yleistettyjen lineaaristen mallien avulla. Siirtymät prosentteina koko aineistolle keskimäärin olivat

Taulukko 4: Kuntomuutosten keskimääräiset prosenttiosuudet havaintoaineistossa

Vauriot		V_{t+1}		
		1	2	3
V_t	1	57.5	41.3	1.2
	2	0	92.0	8.0
	3	0	0	100
Urat		U_{t+1}		
		1	2	3
U_t	1	87.9	11.6	0.5
	2	0	88.7	11.3
	3	0	0	100
Tasaisuus		T_{t+1}		
		1	2	3
T_t	1	20.9	79.1	0.0
	2	0	96.5	3.5
	3	0	0	100

Mallien estimointi ei onnistunut odotusten mukaisesti. Ordinaalisten mallien estimointi epäonnistui kokonaan, koska ruuduissa $M_{t+1}=3 \mid M_t=1$ oli liian vähän aineistoa. Näille siirtymätodennäköisyyksille on ainoa mahdollisuus käyttää koko aineiston keskiarvoja.

5.2.1 Ensimmäiset todennäköisyysestimaatit

Logistisia regressiomalleja sovitettiin todennäköisyyksien $P(M_{t+1}=2 \mid M_t=1)$ ja $P(M_{t+1}=3 \mid M_t=2)$, $M=V, U$ tai T , estimoimiseksi. Tämän ensimmäisen kierroksen tulokset on esitetty alla. Merkintä $p = \text{logit}(x)$ tarkoittaa, että $\log(1/(1-p)) = x$. Kertoimien alla suluissa ovat kerroinestimaatin tarkkuutta kuvaavat suuret kerroinestimaatti/sen hajonta. Luku n on mallin estimoinnissa käytettyjen havaintojen lukumäärä ja ρ^2 on analoginen lineaarisen regressiomallin selitysasteelle.

Vaurioiden sovitukset

$$\begin{aligned}
 1) \quad & p(V_{t+1}=2 \mid V_t=1, K_t, U_t, T_t, K_{t+1}, \text{alue, liikenne}) \\
 & = \text{logit} \quad (-.205 - .638 \text{ liik3}), \\
 & \quad (3.7) \quad (5.0)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{jossa} \quad & 0 \text{ kun KVL} \leq 6000 \\
 \text{liik3} = & 1 \text{ kun KVL} > 6000.
 \end{aligned}$$

Havaintoja oli $n=1709$ ja $\rho^2=1.1\%$. Sovituksen avulla lasketut todennäköisyydet ovat:

KVL	≤ 6000	> 6000
$p(V_{t+1}=2 \mid V_t=1, KVL)$	.449	.301

$$2) \quad p(V_{t+1}=3 \mid V_t=2, K_t, U_t, T_t, K_{t+1}, \text{alue, liikenne})$$

$$= \text{logit} \quad \begin{matrix} (-1.45 - & 1.58 \text{ liik2} - & 2.28 \text{ liik3}), \\ (8.7) & (6.3) & (3.1) \end{matrix}$$

jossa liik3 on sama kuin edellä ja

$$\begin{aligned} & 0 \text{ kun } KVL \leq 1500 \text{ tai } KVL > 6000 \\ \text{liik2} = & \\ & 1 \text{ kun } 1500 < KVL \leq 6000. \end{aligned}$$

Tunnusluvun ρ^2 arvo on 8.5%, $n=949$ ja todennäköisyydet ovat:

KVL	≤ 1500	1501-6000	> 6000
$p(V_{t+1}=3 \mid V_t=2, KVL)$	.190	.046	.023

Uratodennäköisyyksien sovitukset:

$$1) \quad p(U_{t+1}=2 \mid U_t=1, K_t, V_t, T_t, K_{t+1}, V_{t+1}, \text{alue, liikenne})$$

$$= \text{logit} \quad \begin{matrix} (-3.80 - & .992 \text{ alue} + & .694 V_{t2} + & 2.23 V_{t3} + & 1.76 \text{ liik2} + & 2.19 \text{ liik3}), \\ (13.1) & (6.1) & (4.8) & (4.8) & (6.5) & (7.1) \end{matrix}$$

jossa liik2 ja liik3 ovat samoja kuin edellä, alue on =0 Etelä-Suomessa ja =1 Pohjois-Suomessa, ja kun $i=2,3$,

$$\begin{aligned} & 1 \text{ kun } V_t = i \\ V_{ti} = & \\ & 0 \text{ muulloin.} \end{aligned}$$

Tunnusluvun ρ^2 arvo on 8.3%, $n=2411$ ja tasoitettut siirtymätodennäköisyydet ovat:

$$p(U_{t+1}=2 \mid U_t=1, V_t, \text{alue, liikenne})$$

Alue	V_t	KVL-luokka		
		≤ 1500	1501-6000	> 6000
Etelä	1	.022	.115	.167
	2	.043	.207	.286
	3	.173	.549	.651
Pohjoinen	1	.008	.046	.069
	2	.016	.088	.129
	3	.072	.311	.409

$$\begin{aligned}
 2) \quad & p(U_{t+1}=3 \mid U_t=2, K_t, V_t, T_t, K_{t+1}, V_{t+1}, \text{alue, liikenne}) \\
 & = \text{logit} \quad (-2.33 + 1.39 \text{ liik3}), \\
 & \quad (10.0) \quad (3.0)
 \end{aligned}$$

jolle $\rho^2=4.5\%$ ja $n=259$. Todennäköisyydet ovat:

KVL	≤ 6000	> 6000
$p(U_{t+1}=3 \mid U_t=2, \text{liikenne})$	.089	.283

Tasaisuustodennäköisyyksille ei saatu minkäänlaisia malleja, jotka kuvaisivat siirtymätodennäköisyyksien riippuvuuksia muiden kuntomuuttujien luokista tai alueesta tai liikennemääräluokista.

5.2.2 Kritiikkiä

Logististen regressiomallien sovitukset tuottivat laihoja tuloksia. Selityasteet jäivät hyvin pieniksi, eli ilmiön vaihtelusta jäi suurin osa selittämättä. Käytettävissä olevasta aineistosta ei siis irtoa kelpollisia todennäköisyyksiä kuvaavia malleja.

Toinen vaihtoehto on laskea todennäköisyydet suoraan aineistosta keskimääräisinä prosenttiosuuksina erikseen niillä muuttujilla ositetuista taulukoista, joilla näyttää olevan tekemistä ilmiön kanssa. Tämä tapa tuottaa kuitenkin epätasaisia ja osittain epäloogisia tuloksia, koska aineisto ei riitä kattamaan kaikkia kuntomuuttujakombinaatioita.

Edellä esitetyissä mallisovituksissa, huonosta selittävydestä huolimatta, on silti selittäjillä selvästi tilastollisesti merkitsevät ja loogiset kertoimet. Näiden mallien avulla estimoitiin ensimmäiset siirtymätodennäköisyydet. Pitkän tähtäyksen optimointimallia testattiin näillä tuloksilla, jolloin todettiin optimiin pääsemisen olevan onnenkauppaa. Tämän pääteltiin johtuvan siitä, että estimoidut todennäköisyydet vaihtelevat pääasiassa vain liikennemäärän suhteen. Optimoinnin onnistuminen vaatii suurempaa kuntoluokkien välistä vaihtelua siirtymätodennäköisyyksissä nimenomaan jo yksittäisen alue-liikennekombinaation sisällä.

Ongelmaa pohdittaessa todettiin, että koska aineistossa on kuntomuuttujien arvot (edellisissä malleissa käytettiin kuntoluokkia), olisi mahdollista saada ilmiötä herkemmin kuvaavia malleja käyttämällä jatkuva-arvoisia selittäjiä luokkaselittäjien sijaan.

Kuntoluokittaisten todennäköisysestimaattien laskeminen tällaisista malleista on problemaattisempaa kuin edellisistä, joista ne saadaan suoraan. Kaikissa kuntoluokkayhdistelmissä on näet määritettävä selittäjien kulloisetkin arvot. Mutta ura- ja vauriomittausaineistoa ei ole kerätty satunnaisotokseen perustuen, eikä sen yleistettävyyys koko tieverkolle ole mahdollista. Pääteltiin, että jatkuva-arvoisia muuttujia hyödyntävistä malleista voidaan laskea estimaatit käyttämällä kunkin muuttujan luokkakohtaisia keskiarvoja laskemalla ne mahdollisimman laajasta aineistosta, jos mahdollista koko kestopäällysteiseltä tieverkolta. Tämä tapa tuottanee vähintään yhtä harhattomia estimaatteja kuin käytettävissä olevaan ura- ja vaurioaineistoon perustuvista luokkakohtaisista malleista suoraan lasketut.

5.2.3 Toiset todennäköisyysestimaatit

Jatkuva-arvoisten selittäjien käyttö luokiteltujen muuttujien sijasta tuotti odotetun suuntaisen tuloksen. Uusissa malleissa on lähinnä kantavuus lisäselittäjänä verrattuna edellisiin. Verkkotason mallin optimointi tapahtui näillä estimaateilla jo huomattavasti paremmin.

Seuraavassa on lyhyesti esitetty mallit ja niihin perustuvat estimaatit vaurioille, urille ja tasaisuudelle.

Vauriomallit

$$1) \quad p(V_{t+1}=2 \mid V_t=1) = \text{logit} \quad (2.98 - .418\log(KVL) + .00221\text{pääll.ikä} \times U_t)$$

(5.1) (5.9) (2.0)

$$\rho^2 = 1.8\% \text{ ja } n = 1709$$

Taulukko 5: Vauriotodennäköisyyksien $p(V_{t+1}=2 \mid V_t=1)$ estimaatit

		KVL		
		≤1500	1501-6000	>6000
U_t	≤13	.558	.443	.319
	14-19	.600	.486	.358
	>19	.618	.505	.375

$$2) \quad p(V_{t+1}=3 \mid V_t=2) = \text{logit} \quad (6.58 - 1.14\log(KVL) - .00179K_t)$$

(4.5) (5.5) (1.0)

$$\rho^2 = 7.8\% \text{ ja } n = 949$$

Taulukko 6: Vauriotodennäköisyyksien $p(V_{t+1}=3 \mid V_t=2)$ estimaatit

		KVL		
		≤1500	1501-6000	>6000
K_t	1	.145	.046	.011
	2	.169	.055	.013
	3	.173	.056	.014
	4	.181	.059	.015
	5	.196	.065	.016

Uramallit

$$1) \quad p(U_{t+1}=2 \mid U_t=1) = \text{logit} \quad (-8.49 + .891\log(KVL) - .00171K_t - .938\text{alue} + .048V_t)$$

(11.1) (9.0) (2.3) (5.7) (4.1)

$$\text{alue} = 0 \text{ eteläisellä alueella, muualla} = 1$$

$$\rho^2 = 8.2\% \text{ ja } n = 2411$$

Taulukko 7: Uratodennäköisyyksien $p(U_{t+1}=2 \mid U_t=1)$ estimaatit

Etelä	KVL	Kantavuus	V_t		
			0	1-20	>20
	≤1500	1	.047	.053	.171
		2	.055	.062	.196
		3	.057	.064	.202
		4	.060	.067	.211
		5	.065	.073	.226
	<1501-6000	1	.117	.130	.357
		2	.136	.151	.397
		3	.139	.154	.404
		4	.145	.161	.417
		5	.157	.174	.439
	>6000	1	.291	.316	.632
		2	.327	.355	.671
		3	.333	.361	.677
		4	.345	.373	.689
		5	.366	.395	.708
Muu Suomi	≤1500	1	.019	.021	.075
		2	.022	.025	.088
		3	.023	.026	.090
		4	.024	.027	.095
		5	.027	.030	.103
	<1501-6000	1	.049	.055	.178
		2	.058	.065	.205
		3	.059	.067	.210
		4	.062	.070	.219
		5	.068	.076	.234
	>6000	1	.138	.153	.402
		2	.160	.177	.444
		3	.164	.181	.451
		4	.171	.189	.464
		5	.184	.203	.487

$$2) p(U_{t+1}=3 \mid U_t=2) = \text{logit} \quad \begin{matrix} (-17.4 + & 1.96\log(KVL) - & .003534K_t) \\ (4.7) & (4.3) & (1.2) \end{matrix}$$

$$\rho^2 = 11.4\% \text{ ja } n = 259$$

Taulukko 8: Uratodennäköisyyksien $p(U_{t+1}=3 \mid U_t=2)$ estimaatit

Kantavuus	KVL		
	≤ 1500	1501-6000	> 6000
1	.005	.044	.358
2	.008	.062	.443
3	.008	.066	.457
4	.009	.073	.485
5	.011	.086	.531

Tasaisuus

$$p(T_{t+1}=3 \mid T_t=2, K_t, V_t, U_t, K_{t+1}, V_{t+1}, U_{t+1}) = \text{logit} \begin{matrix} (1.46 - & .0241 K_t) \\ (1.0) & (2.4) \end{matrix}$$

$$\rho^2 = 42\% \text{ ja } n = 26$$

Taulukko 9: Tasaisuustodennäköisyyksien $p(T_{t+1}=3 \mid T_t=2, K_t)$ estimaatit

Kantavuus	1	2	3	4	5
$p(T_{t+1}=3 \mid T_t=2, K_t)$	.001	.015	.022	.050	.122

Tasaisuustodennäköisyydelle $p(T_{t+1}=2 \mid T_t=1)$ ei löytynyt minkäänlaista mallia, lähinnä aineiston vähyydestä johtuen, joten se jouduttiin estimoimaan keskiarvona = .791.

Ylläolevat tulokset osoittautuivat loogisiksi ja käyttökelpoisiksi. Niissä on silti suuria puutteita. Etenkin tasaisuutta kuvaavan aineiston puutteet (lähinnä vähäiset havainnot ja vertailukelpoisten vaurio- ja uratietojen puute) näkyvät optimointimallien tuloksissa. Käyttäjien kustannukset riippuvat eniten tien tasaisuudesta ja ovat suuruudeltaan hallitsevia optimoinnissa, joten tasaisuuden tarkka estimointi on erittäin tärkeää. Kantavuus on selittäjänä useimmissa malleissa, mutta sen kerroin on yleensä melko epätarkka. Tähänkin pulmaan tuonee vasta kuntomuuttujien yhtäaikainen mittaus parannusta.

5.2.4 Kolmannet siirtymätodennäköisyydet

Edellä esitetyt toisen kierroksen todennäköisyysestimaatit ovat mukana nykyisessä ylläpitoinvestointien optimointimallissa. Kuten edellä on todettu, estimaatit perustuvat aineistoihin, jotka on kerätty aivan muihin tarpeisiin eivätkä ole edustavia näiden mallien estimoimiseksi. Luvussa 4 esitetty mittausohjelma on käynnistetty vuoden 1988 aikana, ja jos suunnitelmat toteutuisivat, olisi vuoden 1989 syksyllä käytössä kahden peräkkäisen vuoden havaintoaineisto, johon perustuen voitaisiin seuraavat mallit ja estimaatit laskea. Kantavuusmalleja tuskin päästään vielä tällöin parantamaan, koska kantavuuden muutos on hidasta, mutta muiden mallien osalta voidaan odottaa selvästi luotettavampia tuloksia, koska kaikki mittaukset tehdään nyt samoilta tien kohdilta ja mittauskohteet on valittu ositetun satunnaisotannan avulla juuri näiden mallien tarpeita ajatellen.

KIRJALLISUUS

- Cambridge Systematics, Inc.* (1986) Optimization Techniques for Planning Highway Improvements.
- Cambridge Systematics, Inc.* (1987) Design of the TVH Highway Investment Programming System (draft).
- Ekholm, Anders, Green, Mick and Palmgren, Juni* (1986) Fitting Exponential Family Nonlinear Models in GLIM 3.77, GLIM Newsletter No. 13.
- Kestopäällysteiden teiden kunto vuonna 1985*, VTT/TIE, tutkimuslause 535, Espoo 1986.
- Korhonen, Riitta* (1985) Kestopäällysteiden urautumismallit vuoden 1982 aineistosta, TVH 713102.
- Liikenne- ja autokantaennuste 1986-2010*, TVH ja TASKU, TVH 713092, Helsinki 1987.
- McCullagh, P.* (1980) Regression Models for Ordinal Data (with discussion), J.R.Statist.Soc., B, 42, 109-142.
- McCullagh, P. and Nelder, J.A.* (1983) Generalized Linear Models. Chapman and Hall, London.
- Paterson, William D.O.* (1986) Prediction of Road Deterioration and Maintenance Effects: Theory and Qualification, Volume III, The Highway Design and Maintenance Standards Study, The World Bank.
- Paterson, William D.O. and Chesher, Andrew P.* (1986) Application of Failure-time Theory to the Prediction of Surfacing Distress, paper prepared for presentation at the 65th Annual Meeting of the Transportation Board, January 1986.
- Talvitie, Antti and Olsonen, Riitta* (1988) Selecting Asphalt Concrete Condition States for Finland's Highways, paper prepared for presentation at the 67th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 1988.
- Talvitie, Antti ja Viren, Riitta* (1985) Teiden kantavuuden väheneminen kuormituksen funktiona, TVH, muistio.
- Teiden kunto ja palvelutaso*. Tutkimustulokset havaintotietä vuosina 1979-1983, VTT/TIE, tutkimuslause 429, Espoo 1985.
- Tieliikenteen ajokustannukset 1988*, TVH, tutkimustoimisto, no. 11, Helsinki 1988.
- Thompson, P.D., Neumann, L.A., Miettinen, M. and Talvitie, A.* (1987) A Micro-computer Markov Dynamic Programming System for Pavement Management in Finland, North American Conference on Managing Pavements, Vol 1.
- Way, George B., John Eisenberg and Ram B. Kulkarni* (1982) Arizona Pavement Management System: Phase 2 - Verification of Performance Prediction Models and Development of Database, Pavement Management, Transportation Research Record 846.
- Äijö, Juha ja Miettinen, Martti* (1987) Ylläpitotoimenpiteiden valinta ja ajoitus, ylläpitotoimenpiteiden vaikutusten arviointi Delphi-tutkimuksella, Viatek Oy.